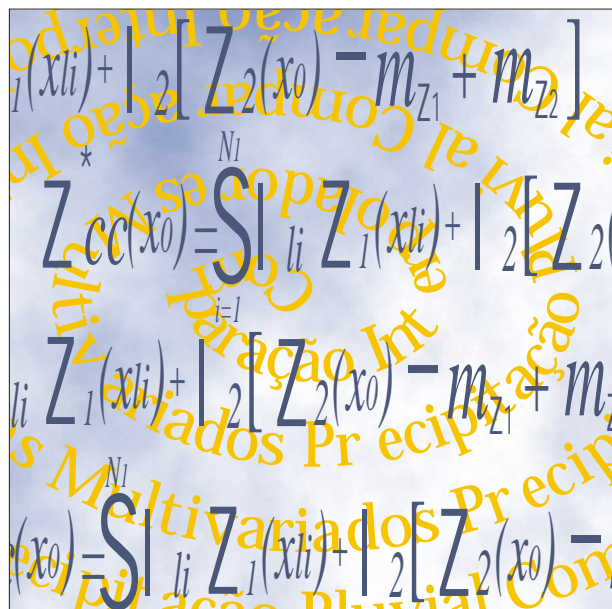


Comparação de Interpoladores Espaciais Multivariados para Precipitação Pluvial Anual no Estado de São Paulo

José Ruy Porto de Carvalho¹
Eduardo Delgado Assad²



O objetivo deste trabalho é incorporar a altitude como variável auxiliar na determinação do mapa de variabilidade espacial de precipitação pluvial para o Estado de São Paulo através da comparação de dois interpoladores geoestatístico multivariados (cokrigagem ordinária e cokrigagem colocizada). Mil e vinte e sete observações de precipitação pluvial anual média provenientes de estações climáticas abrangendo todo Estado de São Paulo, representando uma área de aproximadamente 248.808,8 km² (2,91% do território nacional), no período de 1957 a 1997, compõem a base de dados utilizada no estudo.

Medir dados de precipitação pluvial é relevante em diversos contextos, tais como produção da cultura, manejo dos recursos hídricos, avaliação ambiental, erosão hídrica e avaliação de riscos, por exemplo. A obtenção da correta distribuição espacial para precipitação é primordial no planejamento agrícola, no que diz respeito à instalação de culturas anuais. Além da influência na agricultura, períodos de estiagens muito longos afetam o nível de água dos mananciais e dos reservatórios das usinas hidrelétricas trazendo problemas para o abastecimento urbano e na geração de energia elétrica. A quantificação das chuvas com intensidade superiores ao suporte do ambiente é importante no planejamento agrícola e ambiental para o correto dimensionamento das obras, tanto na construção civil quanto na conservação do solo (Vieira & Carvalho, 2001; Carvalho & Assad, 2002, 2003).

Os dados anuais de precipitação são médias para o período de 1957 a 1997. Todas as análises foram realizadas nestas médias sem se preocupar com as flutuações interanuais. Tabela 1 apresenta as estatísticas básicas da variável em estudo.

Tabela 1. Estatísticas para precipitação anual e altitude em 1.027 estações climáticas.

Variáveis	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	CV	Correlação
Precipitação	1.491	305	1.078	4.378	20%	-0,12
Altitude	563	236	1	1.840	42%	a < 0,1%

Como verifica-se na Tabela 1, a correlação linear entre altitude e precipitação apesar de numericamente baixa, é altamente significativa, indicando que é plausível usar altitude com variável auxiliar na determinação da distribuição espacial de precipitação.

Os índices pluviométricos das estações localizadas no litoral (Fig. 1), devido ao relevo da região (Fig. 2), apresentam resultados que seguem uma ordem própria sendo discrepantes dos demais. Isto ocorre devido ao relevo concordante (a Serra do Mar se dispõem paralelamente à linha da costa), as vertentes a barlavento (lado de onde sopra o vento) são mais expostas aos ventos úmidos. O ar depara-se com a barreira montanhosa e sobe. Ao subir,

¹ Ph.D. em Estatística, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa postal 6041, Barão Geraldo - 13083-970 - Campinas, SP.
(e-mail: jruiy@cnptia.embrapa.br)

² Dr. em Agroclimatologia, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa postal 6041, Barão Geraldo - 13083-970 - Campinas, SP.
(e-mail: assad@cnptia.embrapa.br)

arrefece e satura, dando-se a condensação do vapor de água e a formação de nuvens originando a queda de precipitação do tipo orográfico ou de relevo. As vertentes opostas são mais protegidas pelos ventos e o ar é mais seco pelo que a distribuição de precipitação é mais constante.

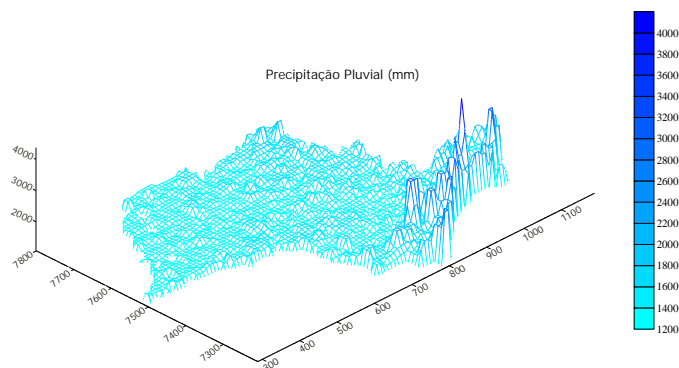


Fig. 1. Precipitação pluvial anual média para o Estado de São Paulo.

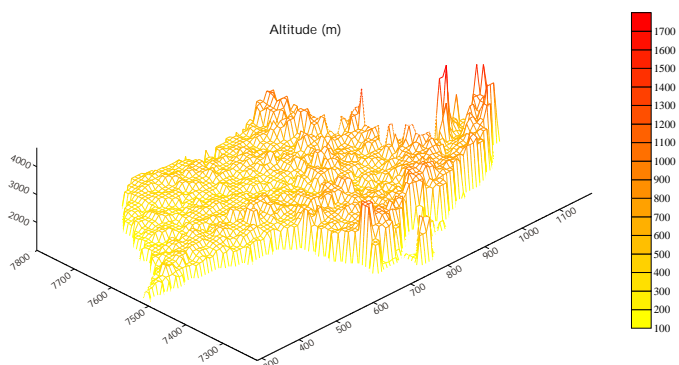


Fig. 2. Altitude de Estações Climáticas do Estado de São Paulo.

A geoestatística foi utilizada para avaliar a variabilidade espacial dos atributos estudados. Segundo Vieira (2000) e Carvalho et al. (2002), é necessário conhecer o grau de dependência espacial entre as amostras, que pode ser avaliado pelo semivariograma, possibilitando construir mapas de isolinhas ou tridimensionais para exame e interpretação da variabilidade espacial. Afirmam também, que a dependência espacial entre as observações pode ser expressa através do semivariograma, estimado pela

$$g^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

onde $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$, separado pela distância h , se a variável for escalar. O gráfico de $g^*(h)$ versus os valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h , e portanto depende de ambos, magnitude e direção de h . Modelos matemáticos devem ser ajustados aos semivariogramas, os quais permitem visualizar a natureza da variação espacial das variáveis estudadas, além de serem necessários para outras aplicações, como por exemplo, krigagem.

Os semivariogramas experimentais para precipitação anual, altitude e o semivariograma cruzado são apresentados nas

Fig. 3, 4 e 5, e são utilizados para avaliar a dependência espacial das variáveis em estudo.

Para todos os semivariogramas, o grau de ajuste do modelo foi verificado através do coeficiente de determinação R^2 , cujos valores 0,86, 0,97 e 0,93 para as Fig. 3, 4 e 5 respectivamente, mostram o quanto o modelo de regressão explica da variabilidade total da variável em estudo. A validação desses modelos foi realizada através do procedimento de auto-validação "Jack-Knifing" (Vieira, 2000).

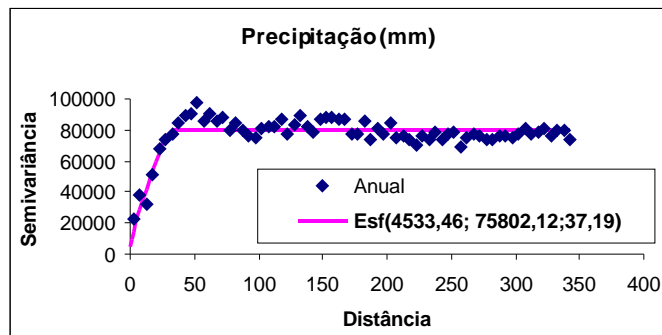


Fig. 3. Semivariograma da precipitação anual média. Modelo esférico ajustado.

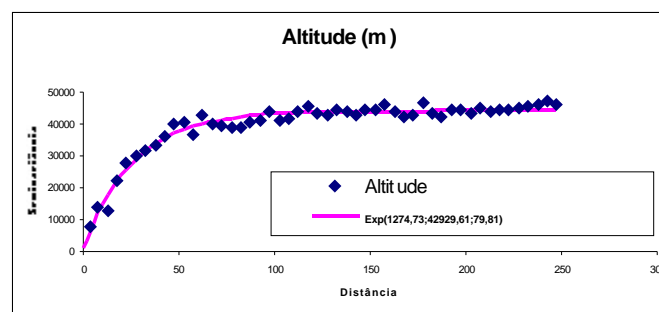


Fig. 4. Semivariograma da altitude. Modelo exponencial ajustado.

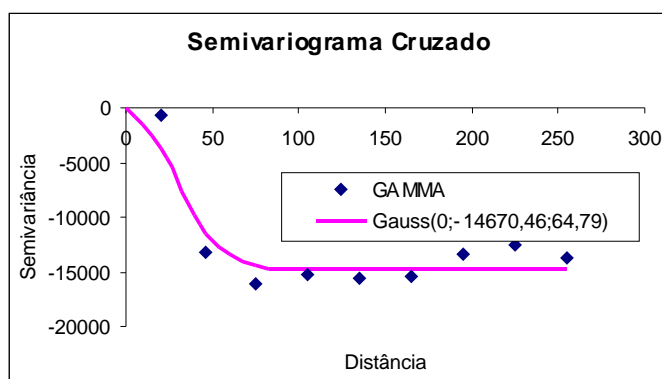


Fig. 5. Semivariograma Cruzado. Modelo gaussiano ajustado.

O exame dos semivariogramas para precipitação anual e altitude, Fig. 3 e 4, revela que existe dependência espacial, onde o efeito pepita $C_0 = 4533,46$ e $C_0 = 1274,73$ e o alcance $a = 37,19$ km e $a = 79,81$ km para as variáveis em estudo são bastante diferentes. O efeito pepita de 4533,46 significa que existe uma descontinuidade entre valores separados por distância menores do que o usado no intervalo de amostragem. A proporção deste valor para o patamar do semivariograma ($C_0 + C_1$), no caso, 5,6% para precipitação

anual e 2,9% para altitude, é um indicativo da quantidade de variação ao acaso de um ponto para outro, e quanto menor seu valor, mais parecidos são os valores vizinhos. O alcance (a) de 37,19 km significa que todos os vizinhos dentro desse raio podem ser usados na estimativa de valores em espaçamentos mais próximos. As variáveis apresentaram isotropia, ou seja, variabilidades idênticas independente da direção escolhida na área experimental.

Como a correlação entre precipitação anual e altitude foi altamente significativa, mostrando que a precipitação é maior para menores altitudes (especificamente no litoral), o semivariograma cruzado entre estas variáveis foi examinado. O modelo ajustado foi o gaussiano (Fig. 5), mostrando que a relação espacial entre precipitação anual e altitude existe e é alto $C_0 = 0$ (quanto maior o efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial do atributo em questão). Conseqüentemente, a variável altitude pode ser usada como variável auxiliar na obtenção de estimativas em lugares não amostrados para a precipitação anual em toda a área em estudo, dentro do alcance.

Diversos métodos de interpolação, com diversos níveis de complexidade, métodos univariados, multivariados, lineares e não-lineares estão disponíveis na literatura (Goovaerts, 1999). Dentre eles estão os métodos geoestatísticos de interpolação, os quais devido ao fato de usar a correlação espacial entre observações vizinhas para prever valores em locais não-amostrados, têm sido muito mais utilizados (Goovaerts, 1997; Carvalho et al., 2002). Krigagem simples ou ordinária são os métodos geoestatísticos univariados que têm sido usado por muitos autores no estudo da distribuição espacial de precipitação pluvial (Isaaks & Srivastava, 1989; Phillips et al., 1992). A extensão multivariada de krigagem, conhecida como cokrigagem, é utilizada quando existe dependência espacial para cada variável em estudo e também entre as variáveis, sendo portanto possível utilizar esta técnica na estimativa de valores não-amostrados (Carvalho et al., 2002; Carvalho et al., 2003). Esta estimativa pode ser mais precisa do que a krigagem de uma variável simples, quando o semivariograma cruzado mostrar dependência entre as duas variáveis (Vieira, 2000).

Na cokrigagem ordinária (Vieira, 2000), para estimar valores Z_2^* para qualquer local x_0 , o valor estimado deve ser uma combinação linear de ambos Z_1 e Z_2 , ou seja

$$Z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(x_{2j}) \quad (2)$$

onde λ_{1i} e λ_{2j} são os pesos associados a cada valor de Z_1 e Z_2 . Tomando $Z_1(x_{1i})$ e $Z_2(x_{2j})$ como sendo uma realização das funções aleatórias, $Z_1(x_{1i})$ e $Z_2(x_{2j})$, respectivamente, e assumindo estacionaridade de ordem 2, o estimador pode ser reescrito em

$$Z_2^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(x_{1i}) + \sum_{j=1}^{N_2} \lambda_{2j} Z_2(x_{2j}) \quad (3)$$

A equação (3) expressa que a estimativa da variável Z_2 deverá ser uma combinação linear de ambos Z_1 e Z_2 , com os pesos λ_{1i} e λ_{2j} distribuídos de acordo com a dependência espacial de cada uma das variáveis entre si e a correlação cruzada entre elas.

De acordo com Goovaerts (1997, 1999), Carvalho & Queiróz (2002) e Carvalho et al. (2003), na cokrigagem colocalizada - CC, quando a variável secundária é conhecida e varia em toda área de estudo, como por exemplo altitude, a perda de informação é muito pequena ao reter no sistema de cokrigagem somente a segunda observação colocalizada com o local x_0 sendo estimado. Desta maneira, o estimador da cokrigagem colocalizada é definido como:

$$Z_{CC}^*(x_0) = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1i} Z_1(x_{1i}) + \lambda_{22} [Z_2(x_0) - m_{Z_1} + m_{Z_2}] \quad (4)$$

onde m_{Z_1} e m_{Z_2} são as médias globais de altitude e precipitação. O segundo termo da equação 4 corresponde em reescalonar a variável colocalizada altitude para a média da variável principal precipitação, de forma a assegurar um estimador não-viciado.

Como dependência espacial para cada variável e entre elas foi obtida, a cokrigagem colocalizada foi usada para estimar valores, usando a altitude como variável colocalizada. A principal vantagem do uso da cokrigagem colocalizada em relação a cokrigagem simples reside no fato de que esta evita instabilidade numérica no sistema de equação causado quando a variável secundária ou auxiliar é muito redundante, além do fato de ser mais rápido sua solução pois o sistema de equação é menor. A desvantagem se limita ao fato de que a variável auxiliar deve ser conhecida em todos os locais que estão sendo estimados.

Os valores obtidos através da cokrigagem ordinária ou a colocalizada são não-viciados, têm variância mínima (Vieira, 2000; Goovaerts, 1997) e são ideais para a construção de mapas de isolinhas ou tridimensionais para verificação e interpretação da variabilidade espacial. As informações mostradas nestes gráficos de isolinhas são muito úteis para melhor entender a variabilidade das propriedades da precipitação pluvial e para identificar áreas que necessitam maiores ou menores cuidados, como pode ser visto nas Fig. 6 e 7. Através da cokrigagem, a variância dos erros de estimativas para precipitação é minimizada, explorando a correlação cruzada entre precipitação e altitude.

Pela comparação dos mapas obtidos, verifica-se que o método de cokrigagem ordinária (Fig. 6) apresenta distribuição espacial um pouco mais homogênea do que o método de cokrigagem colocalizada (Fig. 7). Entretanto, devido à problemas de instabilidade numérica inerente a este método, a Fig. 6 mostra zonas de descontinuidade espacial.

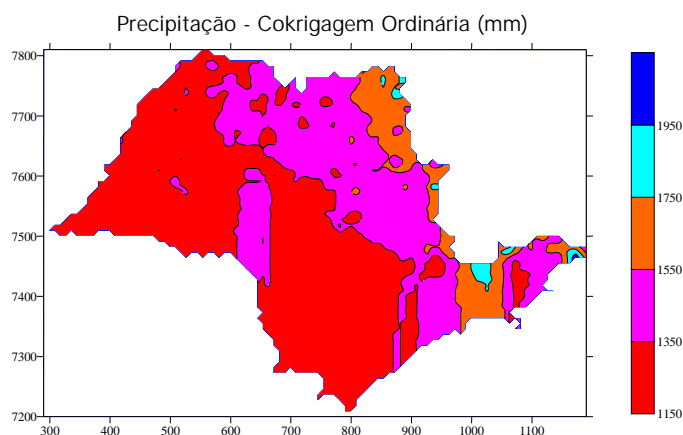


Fig. 6. Mapa de precipitação média anual obtido pelo interpolador de cokrigagem ordinária.

Nota-se na Fig. 7, que existem bolsões de precipitação bem definidos, o que segundo Goovaerts (1997) é uma característica própria do método de cokrigagem colocalizada pois este não apresenta os efeitos de instabilidade numérica que os outros possíveis métodos apresentam e conseqüentemente mostra mais detalhes do que os outros. A possibilidade do método delinear com clareza estes bolsões são de grande importância para estudos como zoneamento agrícola, previsão de safras, caracterização climatológica, etc.

Apesar dos métodos de cokrigagem usarem a variável auxiliar altitude na estimativa de valores não-amostrados, esta técnica apresentou para os dados em questão um grande erro espacial, verificados pelas faixas de descontinuidade. Este erro espacial pode ser ocasionado ou pela instabilidade numérica do método ou pelo uso de dados inapropriados. Estudos com outros interpoladores devem ser desenvolvidos para que se obtenha uma melhor distribuição espacial para precipitação pluvial para o Estado de São Paulo.

A performance destes interpoladores foi obtida e comparada usando o critério do quadrado médio do erro - QME (Addink & Stein, 1999; Phillips, et al. 1992), conforme a fórmula:

$$QME = \frac{\sum_{a=1}^{n(u)} (Z_{est,a} - Z_a)^2}{n(u)} \quad (5)$$

onde $Z_{est,a}$ são os valores estimados pelo interpolador e Z_a são os valores reais de precipitação.

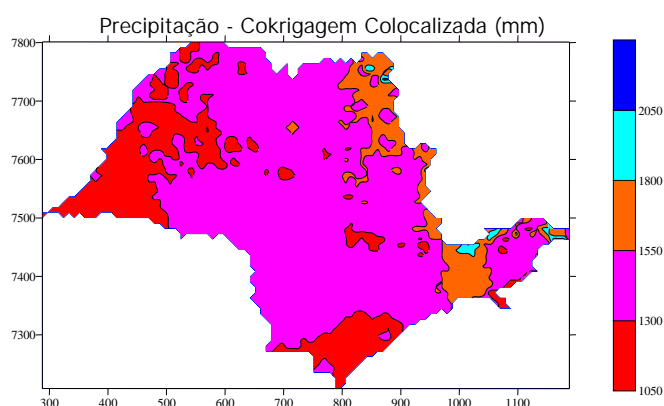


Fig. 7. Mapa de precipitação média anual obtido pelo interpolador de cokrigagem colocalizada.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para o critério de comparação QME. O valor do critério deve ser próximo de zero se o algoritmo é preciso. Baixos erros estimados são obtidos para os dois interpoladores. Para os dados em questão, o interpolador que apresentou resultado mais acurado foi o de cokrigagem ordinária, apesar que a

Tabela 2. Valores do quadrado médio do erro para interpoladores usado na distribuição espacial de precipitação anual.

Quadrado Médio do Erro	
Cokrigagem Colocalizada	Cokrigagem Ordinária
24,38	24,87

Conclusões

- O uso de altitude como variável auxiliar beneficia os dois interpoladores estudados entretanto, na cokrigagem ordinária ela auxilia numa maior uniformidade da distribuição espacial.
- As observações são espacialmente dependente até um alcance de 37,19 Km, em todas as direções.
- Cokrigagem colocalizada evita os efeitos de instabilidade numérica no sistema de equações, causados pela redundância de observações da variável auxiliar.
- Computacionalmente é mais rápido pelo fato dos sistemas de equações serem reduzidos.

Referências Bibliográficas

ADDINK, E. A.; STEIN, A. A comparison of conventional and geostatistical methods to replace clouded pixels in NOAA-AVHRR images. *Int. J. Remote Sensing*, v. 20, n. 5, p. 961-977, 1999.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo: comparação de interpoladores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia. [Anais ...]. Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM.

CARVALHO, J. R. P. de; ASSAD, E. D. Comparação de interpoladores espaciais univariados para precipitação pluvial anual no Estado de São Paulo. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado Técnico). No prelo.

CARVALHO, J. R. P. de; QUEIRÓZ, E. Uso da cokrigagem colocalizada na determinação da distribuição espacial de precipitação. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2002. (Embrapa Informática Agropecuária. Comunicado Técnico). No prelo.

CARVALHO, J. R. P. de; QUEIROZ, E. F. de; VIEIRA, S. R. Uso da geoestatística multivariada com incorporação de altitude na interpolação espacial de precipitação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Riberão Preto. [Anais ...]. Riberão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.

CARVALHO, J. R. P. de; SILVEIRA, P. M. da; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, DF, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

GOOVAERTS, P. Performance comparison of geostatistical algorithms for incorporating elevation into the mapping of precipitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOCOMPUTATION, 4th, 1999, Fredericksburg. GeoComputations conference proceedings... [Fredericksburg]: Mary Washington College, 1999. Disponível em: < http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/023/gc_023.htm > . Acesso em: 23 ago. 2002.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. Applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

PHILLIPS, D. L.; DOLPH, J.; MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitations in mountainous terrain. Agric. and Forest Meteor., n. 58, p. 119-141, 1992.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ V., V. H; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. de. Estudo da periodicidade temporal de chuvas em bacia hidrográfica dos Rios Turvo / Grande uma proposta. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 17 p. (Embrapa Informática Agropecuária. Documentos, 10).

Comunicado Técnico, 49

**Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento**
Governo Federal

Embrapa Informática Agropecuária
Área de Comunicação e Negócios (ACN)
Endereço: Caixa Postal 6041 - Barão Geraldo
13083-970 - Campinas, SP
Fone: (19) 3789-5743
Fax: (19) 3289-9594
e-mail: sac@cnptia.embrapa.com.br

1ª edição on-line - 2003

© Todos os direitos reservados.

Comitê de Publicações

Presidente: *Luciana Alvim Santos Romani*
Membros Efetivos: *Carla Geovana Macário, Ivanilde Dispatto, Marcia Izabel Fugisawa Souza, Marcos Lordello Chaim, Suzilei Almeida Carneiro*
Suplentes: *Carlos Alberto Alves Meira, Eduardo Delgado Assad, José Ruy Porto de Carvalho, Maria Angelica Andrade Leite, Maria Fernanda Moura, Maria Goretti*

Expediente

Supervisor editorial: *Ivanilde Dispatto*
Normalização bibliográfica: *Marcia Izabel Fugisawa Souza*
Editoração eletrônica: *Área de Comunicação e Negócios*